Advertencia.- El contenido de este documento ha sido actualizado en la versión en inglés (2002) y se encuentra disponible en:

http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaca/i/fulltext/hdpei/hdpei.pdf

Emisarios submarinos de pequeño diámetro de polietileno de alta densidad

Fred M. Reiff
Asesor Regional OPS/HEP

Fecha de la version original: 1986

Noviembre 2000

Traductor Henry J. Salas
Asesor en Evaluación de Impacto Ambiental y Salud
CEPIS

OPS/CEPIS/PUB/00.54
Original: inglés



CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA
Y CIENCIAS DEL AMBIENTE
(CEPIS)

EMISARIOS SUBMARINOS DE PEQUEÑO DIÁMETRO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)

FRED M. REIFF
Asesor Regional OPS/HEP

Fecha de la versión original: 1986
Noviembre 2000

Traductor: Henry J. Salas
Asesor en Evaluación de Impacto Ambiental y Salud
CEPIS



DIVISIÓN DE SALUD Y AMBIENTE
ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD
OFICINA SANITARIA PANAMERICANA, OFICINA REGIONAL DE LA
ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD



INDICE

FIGURAS

1. EMISARIOS SUBMARINOS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD PARA AGUAS RESIDUALES

Hasta hace algunos años, solo las ciudades costeras medianas o grandes tenían emisarios submarinos profundos debido principalmente a las dificultades de su construcción, alto costo del equipo especializado que requieren y a la falta de profesionales locales debidamente capacitados. Actualmente, con la disponibilidad de materiales plásticos y métodos modernos de construcción es posible que las pequeñas comunidades puedan disponer de recursos para emisarios submarinos relativamente largos y emplear mano de obra local en su mayor parte. Los materiales de tubería[1] más comunes son el polietileno de alta densidad con peso molecular alto y el polietileno de alta densidad con peso molecular extra alto. Del peso molecular dependen las características de rudeza, durabilidad, resistencia al impacto, a la abrasión y al agrietamiento por esfuerzo ambiental. El peso molecular extra alto facilita el procedimiento de fusión de extremos de la tubería. Cuando se usa el término HDPE (acrónimo en inglés, polietileno de alta densidad) en este documento, se refiere a ambos materiales. La tubería de estos materiales tiene las siguientes ventajas:

a. Es ligera y fácil de manejar; generalmente la labor manual es suficiente para manipular tramos de 30 cm de diámetro.

b. Puede ser ensamblada fácilmente en la playa por fusión de los extremos (es posible extrudir en forma continua en la orilla, pero es muy lento para la mayor parte de las situaciones).

c. Las juntas fusionadas correctamente son más fuertes que la tubería misma, lo que evita futuras fugas en la unión debido a sedimentación o movimiento.

d. Es suficientemente flexible como para ser colocada fácilmente en una ruta escabrosa, evitándose la remoción de rocas sumergidas, arrecifes, etc.

e. El método de fusión de extremos es suficientemente rápido como para permitir la instalación de un emisario submarino en un día.

f. El polietileno es esencialmente inmune a los efectos corrosivos del agua marina y a los ataques de los organismos marinos.

g. La tubería de HDPE es suficientemente ligera y fuerte como para ser jalada y colocada en su sitio usando pequeños botes para remolque y alineación.

h. Si es necesario, la tubería puede ser reflotada inyectándole aire comprimido.

La tubería de HDPE es apropiada para fondos de arena, lodo, grava y pequeñas rocas, pero requiere de pesas externas (usualmente hormigón armado) para mantenerla en su lugar e impedir que flote o se mueva por las fuerzas hidrodinámicas. También puede colocarse sobre rocas siempre que no esté sobre una punta o un escollo cortante.

---

[1] Se usan tuberías de polipropileno, polibutileno y PVC, pero éstas no se discuten en el presente documento

Sus principales desventajas son:

a. El HDPE es un material relativamente suave que puede ser dañado por las anclas de los grandes barcos que enganchan y jalan la tubería. Sin embargo, su alta resistencia al impacto protegerá la tubería de astillarse y romperse.

b. En áreas sujetas a las fuerzas destructivas de tormentas en las zonas de oleaje y de mareas, se requiere protección adicional para enterrar o encasillar en concreto o piedras sueltas (rip-rap) la tubería, como sucede con la mayoría de los materiales para tuberías de emisarios submarinos.

c. Si el emisario contiene trampas de aire, puede flotar si hay acumulación de gases.

2. EVALUACIÓN DE LA RUTA SUBMARINA

Para evaluar la ruta submarina es conveniente obtener la máxima información lo antes posible. Las cartas náuticas, mapas oceanográficos, cartas y sondeos de sonar, así como muestras del fondo, son fuentes de información que permiten establecer someramente la ruta del emisario submarino. Se recomienda hacer una evaluación para ubicar la ruta de cada emisario submarino, ya que pequeños factores que no aparecen en los mapas o la pantalla del sonar pueden causar serios problemas a la tubería.

En el caso de emisarios submarinos de HDPE, esta evaluación tiene como propósito adicional obtener la mayor ventaja de la extrema flexibilidad de la tubería para reducir los costos de instalación. Generalmente, es menos costoso evitar obstáculos tales como grandes rocas, arrecifes o áreas problemáticas con escollos y caídas abruptas, en vez de removerlos. Por lo tanto, es importante trazar una ruta libre de obstáculos (o al menos que minimice la remoción de obstáculos) y que termine en la ubicación y profundidad deseada. El tiempo y dinero empleado en determinar la mejor ruta representa una buena inversión que ahorra una gran cantidad de problemas durante la instalación. La evaluación no sólo debe designar la ruta seleccionada, sino que debe ubicar físicamente los obstáculos y las áreas problemáticas.

La evaluación de la ruta de los emisarios submarinos de HDPE de pequeño diámetro, debe ser hecha por buzos experimentados. Es preferible que uno de los buzos sea ingeniero. Para la evaluación exploratoria preliminar, los buzos pueden usar brújulas y el rumbo estimado desde el punto de entrada del emisario submarino hasta el punto terminal deseado. Al mismo tiempo, deben instalar boyas numeradas en cada área problemática y, al regreso, estimar la distancia entre las áreas problemáticas usando una rueda o cinta medidora. Es importante que el buzo mantenga un registro en donde describa las áreas problemáticas y anote las condiciones del fondo y los materiales existentes a lo largo de la ruta, relacionándolos con el número respectivo de boya. Las fotografías y los videos de las áreas críticas pueden ser útiles. Si el área problemática es pequeña, las boyas deben anclarse o amarrarse firmemente en el centro del área problemática; si ésta es grande, se debe marcar tanto al inicio como en el fin.

En la segunda buceada exploratoria, el buzo tratará de determinar una ruta libre a ambos lados de cada obstáculo. Si tiene éxito, entonces marcará toda la ruta con boyas de diferente color desde el área donde está el obstáculo para facilitar la determinación tanto de la ruta preferida como de las áreas problemáticas desde la superficie del agua y de la orilla. Alrededor de los obstáculos, la distancia entre las boyas puede ser de cinco metros, pero en rutas sin obstáculos usualmente la distancia es de 50 metros. Es importante que las boyas sean lo suficientemente grandes y de colores brillantes para que puedan ser fácilmente visibles, que estén atadas con una cuerda suficientemente fuerte y con un anclaje seguro para prevenir que sean arrastradas por las corrientes, olas y viento. También sería ventajoso numerarlas.

Si la ruta alrededor de los obstáculos no tiene curvas con radios menores a 40 veces el diámetro de la tubería, el emisario submarino de HDPE puede ser doblado fácilmente a la forma requerida. Si existen curvas extremadamente agudas, podría ser necesario instalar codos prefabricados. Esto requerirá una medición exacta de ángulos y de la distancia entre los ángulos. Aunque la fabricación de un emisario submarino de HDPE con una ubicación precisa de los codos, así como su localización exacta puede parecer fácil en el papel, una vez en el océano con movimientos más turbulentos que los esperados, con corrientes repentinas, problemas de botes y otras complicaciones imprevistas, la localización exacta de tres o cuatro codos puede ser extremadamente difícil. Si existe la posibilidad de escoger entre seleccionar una ruta que requiere codos o una ruta más larga que no requiera codos prefabricados, es preferible optar por la segunda.

Al establecer dos puntos de control en la orilla es posible usar triangulación hacia las boyas para registrar la ruta con suficiente exactitud para futura referencia. La distancia desde la orilla entre los puntos de triangulación no debe ser menor de 1/4 de la longitud del emisario submarino.

3. PRESERVACIÓN DE LAS BOYAS MARCADORAS

Usualmente, las evaluaciones preliminares se llevan a cabo antes de la fase de diseño y hay un lapso considerable antes que se inicie la construcción. Por lo tanto, es aconsejable quitar las boyas hasta que se inicie la etapa de construcción. Cuando este es el caso, se pueden utilizar marcadores de fondo visibles y reubicables, tales como bloques de concreto de colores numerados para facilitar el restablecimiento de la ruta con boyas marcadoras. Muchos emisarios submarinos de HDPE de pequeño diámetro de menos de 1.000 m toman pocos días para su instalación. Durante este período de construcción es necesario evitar la manipulación de las boyas marcadoras con cualquier medida que sea necesaria o recomendada por las autoridades locales, tales como avisos preventivos colocados en las boyas mismas, avisos colocados en pequeños botes, avisos a los navegantes y pescadores para que no sólo eviten chocar contra las boyas sino que se mantengan fuera de la zona de construcción de la tubería. Al mismo tiempo, es buena idea incluir la ubicación del emisario submarino en las cartas náuticas y mapas costeros tan pronto como sea posible y advertir que no se debe anclar cerca del emisario submarino.

4. SELECCIÓN DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA

La selección del diámetro de la tubería para emisarios submarinos de HDPE se hace con la misma serie de determinaciones como para otro material de tubería. Usualmente se utiliza el balance de la reducción de pérdida de fricción contra las velocidades de flujo necesarias para mantener el suficiente arrastre que evitará la deposición de residuos o el crecimiento de bacterias. La tubería de HDPE tiene excelentes características de flujo debido a su pared excepcionalmente suave; tiene una constante de la fórmula de Hazen-Williams de C = 155 para agua y C = 140 para aguas servidas. Esto permite una selección de mayor velocidad y menor diámetro que para la mayoría de otros materiales de la tubería.

Para emisarios submarinos que utilizan tubería de HDPE y que transportan desagües tratados con militamices, tanques sépticos u otros tratamientos más completos, la velocidad de flujo que ha probado ser satisfactoria desde el punto de vista tanto de fricción como de limpieza, usualmente está dentro de los rangos presentados en el cuadro 1.

Cuadro 1
Rangos de velocidad de flujo para emisarios submarinos de HDPE

Tamaño nominal de la tubería (cm)	Rangos satisfactorios de velocidad (metro/segundo)
10-30	0,7-2
25-50	1,2-3
40-75	2-4

Es importante que se obtengan las velocidades de limpieza por lo menos una vez al día durante un tiempo suficiente para conseguir un lavado completo de la tubería. Si este no fuera el caso, se presentarían deposiciones de sólidos o grasa y crecimiento de bacterias en las paredes y sería necesario usar un dispositivo limpiador ("chancho") dentro del emisario submarino para prevenir su constricción o cierre. Cuando se diseña un emisario submarino para un flujo proyectado de 25 años es importante revisar las velocidades de los flujos máximos actuales para ver si se obtienen velocidades suficientes de arrastre en los primeros años de operación. Si no fuera así, se debe implementar un programa de limpieza con un dispositivo limpiador hasta que los flujos alcancen las velocidades de limpieza.

Se recomienda instalar facilidades para remover arena y grasa del efluente antes de su descarga en el emisario submarino para ayudar a minimizar los problemas ocasionados por su deposición. Esta remoción de grasa y de elementos flotantes tiene el propósito de mantener las condiciones estéticas aceptables.

Los nomogramas de las figuras 1 (unidades métricas) y 2 (unidades inglesas) basadas en la fórmula de Hazen-Williams, pueden usarse para determinar las pérdidas de presión y velocidades para diversas tasas de flujo en diferentes diámetros internos de tubería.

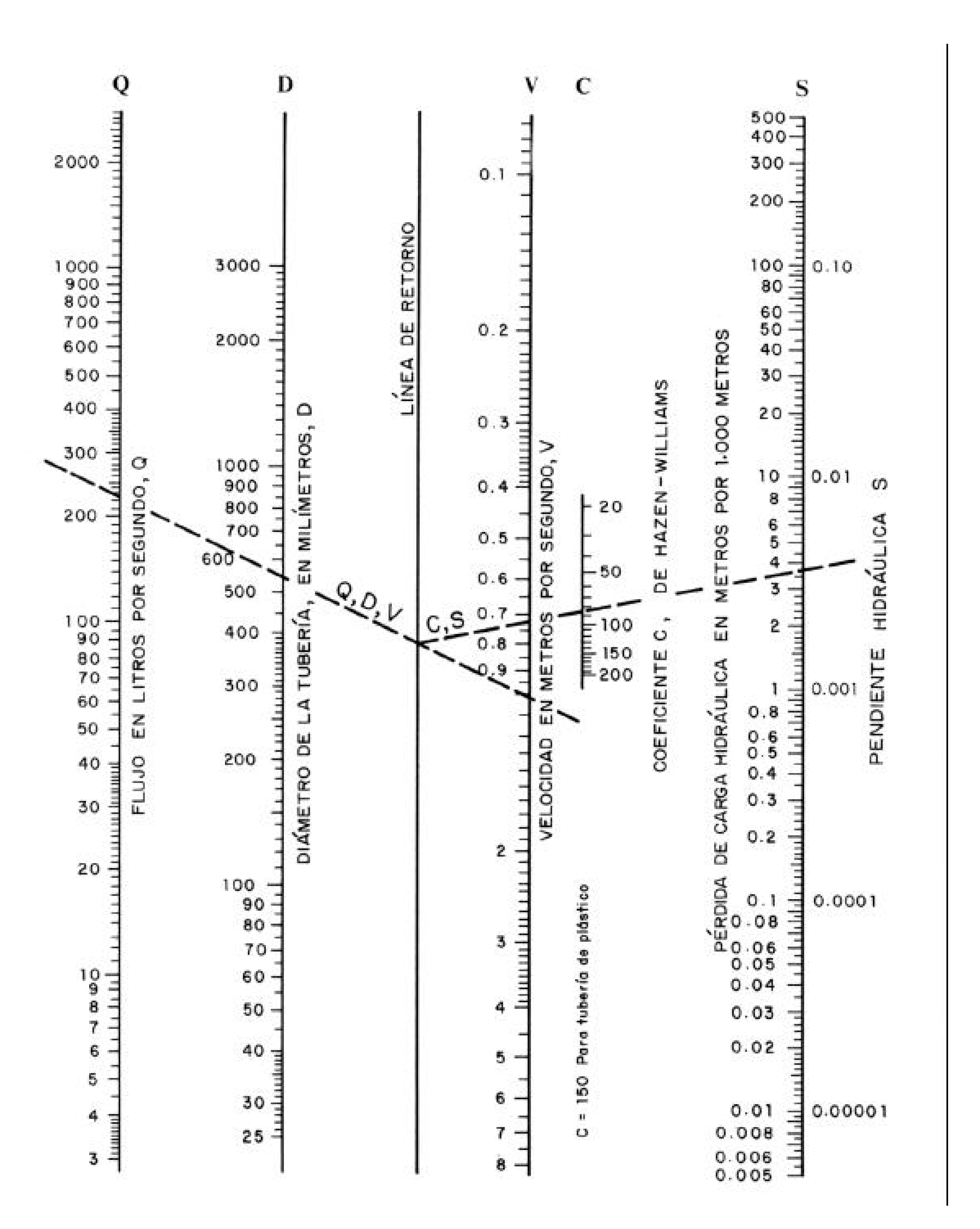


Figura 1

NOMOGRAMA PARA SOLUCIÓN (unidades métricas)
Tomado de F.E. McJunkin, 1969

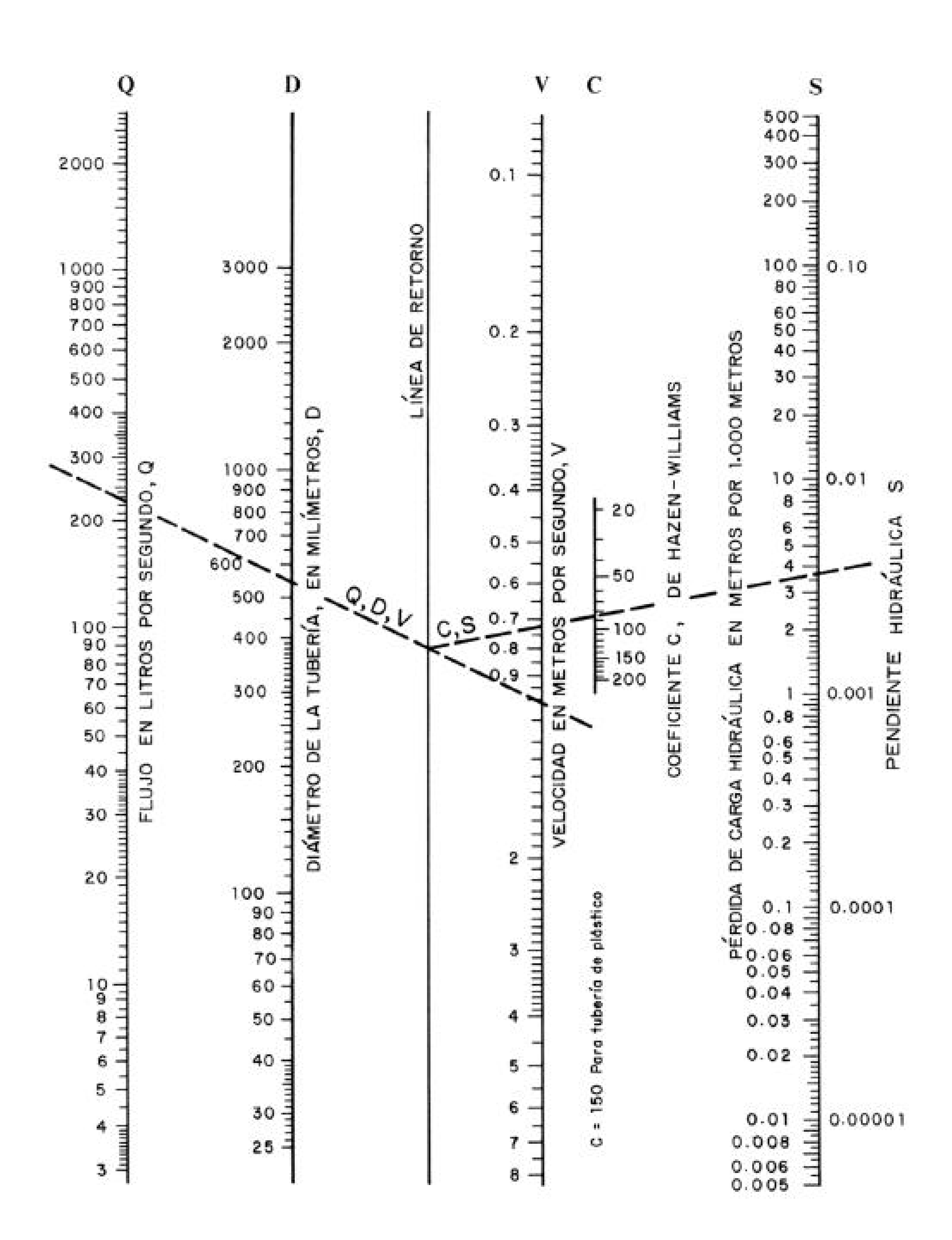


Figura 2

NOMOGRAMA PARA SOLUCIÓN (unidades inglesas)
Tomado de F.E. Mcjunkin, 1969

Las tuberías de polietileno están dimensionadas por un diámetro exterior controlado y por el espesor mínimo de la pared a fin de obtener la presión deseada por el método de razón de dimensión estándar (SDR) o por las normas de la Organización Internacional de Normalización, (ISO, acrónimo en inglés). Los cuadros 2 y 3 presentan los diámetros externos e internos y el peso promedio por unidad de longitud (kg/m) de las tuberías fabricadas de acuerdo de los métodos de SDR y de la ISO, respectivamente.

5. CONSIDERACIÓN DE MAREAS Y DENSIDAD DEL AGUA MARINA

Es importante advertir que las pequeñas comunidades deben mantener sus costos de operación tan bajos como sea posible. Esto significa que el diseñador del emisario submarino deberá tratar de usar la carga hidráulica estática de gravedad y evitar bombear las aguas residuales que se van a descargar.

Se debe recordar que el tiempo de fluctuaciones de las mareas cambia diariamente y que la magnitud de los cambios varía durante el año y fases de la luna. Se puede asumir que la marea más alta y que el flujo pico de las aguas residuales probablemente ocurran simultáneamente. El emisario submarino y sus accesorios, tales como ecualizadores de flujo o bombas, deben diseñarse en concordancia, a fin de evitar una sobrecarga indeseable del desagüe que tiene conexiones de servicio.

También debe recordarse que el agua marina tiene una densidad de aproximadamente 2,5% más que la de las aguas residuales. Esta carga hidráulica estática debe ser superada por la carga de gravedad disponible o por las instalaciones de bombeo. Esta carga hidráulica puede ser significativa, especialmente en emisarios submarinos profundos. Por ejemplo, un emisario submarino de 60 metros de profundidad tiene una carga hidráulica estática de "diferencia de densidad" de uno y medio metros.

6. SELECCIÓN DE LAS RESINAS DE POLIETILENO

Existen distintas clases de resinas de polietileno que se utilizan en la fabricación de tuberías. Algunas no son apropiadas para emisarios submarinos porque se requiere resina de alta calidad con propiedades específicas a fin de asegurar que la tubería resista los esfuerzos durante la construcción, las presiones internas y externas, así como los esfuerzos hidrodinámicos del océano.

Se debe seleccionar una tubería de resina de alta densidad con un peso molecular alto o extra alto. Es imprescindible evitar la tubería fabricada con polietileno de media densidad porque se ha demostrado sus fallas. La Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (The American Society for Testing Materials, ASTM) ha elaborado la norma ASTM D3350-84 que describe el material por medio de un sistema de clasificación por celda. El sistema identifica específicamente el compuesto de polietileno mediante límites de clasificación de celda para cada una de las propiedades consideradas. El cuadro 4 resume este sistema. Una resina con peso molecular extra

Cuadro 2
Dimensión y peso de las tuberías de polietileno de alta densidad (dimensiones de la ISO)

DIÁMETRO EXTERIOR (mm)	PRESIÓN DE TRABAJO EN KG/CM^2 (SDR)							
	2,5 (40,8)		3,2 (32)		4,0 (26)		6,0 (17,6)	
	DIÁM. INT. PROMEDIO (mm)	PESO PROMEDIO (kg/m)	DIÁM. INT. PROMEDIO (mm)	PESO PROMEDIO (kg/m)	DIÁM. INT. PROMEDIO (mm)	PESO PROMEDIO (kg/m)	DIÁM. INT. PROMEDIO (mm)	PESO PROMEDIO (kg/m)
200			187,6	3,84	184,6	4,69	177,2	6,79
225			211	4,84	207,6	5,96	199,4	8,55
250			234,4	5,99	230,6	7,37	221,6	10,60
280			262,6	7,47	258,4	9,18	248,2	13,20
315			295,4	9,45	290,6	11,70	279,2	16,70
355			332,8	12,10	327,6	14,70	314,8	21,20
400	380,4	12,10	375,2	15,20	369,2	18,70	354,6	26,90
450	428	15,20	422	19,20	415,2	23,70	399	34,21
500	475,6	18,92	469	23,82	461,4	29,35	443,4	42,20
560	532,6	23,73	525,2	29,85	516,8	36,79	496,6	52,90
630	599,2	30,00	590,8	37,79	581,4	46,54	558,6	67,10
710	675,2	38,17	665,8	47,90	655,2	58,97	629,6	85,20
800	760,8	48,39	750,2	60,91	738,4	74,69	709,4	107
900	856	61,02	844	77,00	830,6	95,00	798	136
1.000	951,2	75,26	937,8	95,19	923	117,12		
1.100	1.046,4	90,98	1.031,8	114,75	1.015,4	140,6		
1.200	1.141,4	108,55	1.125,6	136,51	1.107,6	167		
1.400	1.331,6	147,31	1.313,2	185,28				

Cuadro 3
Dimensión y peso de las tuberías de polietileno de alta densidad
(dimensiones de IPS convertido al sistema métrico)

DIÁMETRO NOMINAL (pulg.)	DIÁMETRO EXTERIOR (mm)	PRESIÓN DE TRABAJO EN KG/CM2 (psi) [SDR]							
		2,68 (40) [41]		3,35 (50) [32,5]		4.36 (65) [26]		5,37 (80) [21]	
		DIÁM. INT. PROMEDIO (mm)	PESO PROMEDIO (kg/m)	DIÁM. INT. PROMEDIO (mm)	PESO PROMEDIO (kg/m)	DIÁM. INT. PROMEDIO (mm)	PESO PROMEDIO (kg/m)	DIÁM. INT. PROMEDIO (mm)	PESO PROMEDIO (kg/m)
8	218			205	4,54	201	5,64	197	6,90
10	273			255	6,99	251	8,73	245	10,73
12	324			303	9,82	297	12,29	291	15,07
14	356			332	11,98	327	18,73	320	18,18
16	406			380	15,55	373	19,37	365	23,76
18	457			427	19,78	420	24,52	411	30,04
20	508			475	24,42	467	30,21	457	37,08
22	559			522	29,57	513	36,63	502	44,92
24	610			570	35,15	560	43,58	548	53,45
26	660			617	41,28	607	51,17	594	62,69
28	711			665	47,91	653	59,36	639	72,70
30	762	723	43,90	712	54,94	700	68,12	685	83,52
32	813	771	49,89	760	62,56	747	77,52	731	94,98
34	864	819	56,35	807	70,59	793	87,48	776	107,23
36	914	867	63,20	855	79,13	840	98,10	822	120,22
42	1.067	1.012	85,92	997	107,73	980	133,49	959	163,64
48	1.219	1.156	112,31	1.140	140,74	1.120	174,39	1.096	213,74
54	1.372	1.301	142,13	1.282	178,14	1.260	220,74	1.233	270,43

Cuadro 4
Clasificación de celdas según la ASTM D3350-84

Propiedad	**Método de prueba**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Densidad, (g/cm^3)	D1505	0,910-0,925	0,926-0,940	0,941-0,955	>0,955		
Índice de fusión Condición E (gms/10 min)	D1238	> 1,0	1,0 - 0,4	0,4 - 0,15	< 0,15		
Módulo de flexión Mpa, (psi)	D790	< 138 (<19.999)	139-275 (20.000 - 39.999)	276 - 551 (40.000 - 79.999)	552 - 757 (80.000 - 109.999)	758-1103 (110.000 - 160.000)	> 1.103 (>160.000)
Esfuerzo a la tracción Mpa (psi)	D638	< 15 (<2.200)	15 - <18 (2.200 - 2.599)	18 - <21 (2.600 - 2.999)	21 - <24 (3.500 -3.499)	24 - 28 (3.00 -3.999)	>28 (>4.000)
Resistencia al agrietamiento por esfuerzo ambiental Condición Duración (hr) Falla, max, %	D1693	A 48 50	B 24 50	C 192 20			
Base de diseño hidrostático Mpa (psi), (23^0C)	D2837	5,52 (800)	6,89 (1.000)	8,62 (1.250)	11,03 (1.600)		
Estabilizador UV y color	A Natural	B Colorado	C Negro con 2% min. Negro de carbón	D Natural con estabilizador UV	E Colorado con estabilizador UV		

alto tiene una clasificación de celda 345434C. Una resina con peso molecular alto tiene la clasificación de celda 325434C.

Es importante destacar las diferentes características de las tuberías fabricadas con resinas de peso molecular alto y extra alto. Las de peso molecular extra alto son superiores en cuanto a su resistencia a la rudeza, al impacto, a la abrasión, al agrietamiento por esfuerzo ambiental y durabilidad. El peso molecular extra alto facilita también los procedimientos de fusión de extremos de la tubería.

7. SELECCIÓN DE LA RAZÓN DE DIMENSIÓN ESTÁNDAR DE LA TUBERÍA (SDR)

Un término relacionado con las tuberías de plástico es la razón de dimensión estándar, abreviada por el acrónimo SDR en inglés y definida por la fórmula:

$$SDR = \frac{D}{t}$$

donde

D = es el diámetro exterior de la tubería
t = es el grosor mínimo de la pared

La tasa de la presión de la tubería está dada por la fórmula:

$$P = \frac{2S}{SDR - 1}$$

donde S = el esfuerzo hidrostático de diseño = 800 psi (56,24 kg/cm^2) a 23 °C para HDPE.
(Se determinó este esfuerzo hidrostático de diseño mediante la prueba ASTM D-2837 y un factor de seguridad de 50%)

Todas las tuberías del mismo material y con SDR idéntico tienen la misma tasa de presión sin tener en cuenta el diámetro. En el cuadro 5 se presentan algunas relaciones entre la SDR y la presión de trabajo. La selección de la SDR apropiada para un emisario submarino depende de factores tales como:

. presurización interna;
. fuerzas externas (especialmente en las zonas de rompiente del oleaje);
. presiones debidas al manejo y construcción;
. separación de los lastres.

Cuadro 5

Tasa de presión de las tuberías de HDPE con diferente SDR

SDR	41	32,5	26	21	19	17	11
Tasa de presión de la tubería							
Libras/pulgada cuadrada (psi)	40	51	64	80	90	100	160
Kg/cm^2	2,8	3,6	4,5	5,6	6,3	7,0	11,2

Si sustituye D/t en lugar de la SDR en la ecuación y reordena los términos se obtiene:

$$P = 2St/(D-t) \quad o \quad S = P\,(D-t)/2t$$

que es la ecuación de la Organización Internacional de Normalización (ISO) para determinar la presión de trabajo de la tubería termoplástica. En la ecuación de la ISO para tuberías de HDPE, la tensión admisible es $S = 50\ kg/cm^2$.

Generalmente, la sección del emisario submarino que recibe mayor presión es la que está dentro de la zona rompiente del oleaje, usualmente representada por profundidades menores de 15 metros en mar abierto y por profundidades menores de 6 metros en áreas protegidas del mar abierto. En esta zona ocurre la mayor presión externa desde las corrientes, es la que recibe el impacto de objetos traídos por éstas y las olas, y es la más propensa a minarse. Es también el área que soporta la mayor presión interna y está sujeta a impactos por la colocación de los lastres rocosos. Por lo tanto, la sección de tubería a través de esta zona frecuentemente se selecciona con una SDR menor (pared de tubería más gruesa) que la sección fuera de la zona rompiente del oleaje a fin de contrarrestar el impacto adicional, flexión, fuerzas cortantes y de zuncho. Una SDR con un rango de 11 a 21 es el que usa comúnmente en la zona rompiente del oleaje y de 19 a 32,5 para la sección fuera de esta zona.

8. ANCLAJE DE LOS EMISARIOS SUBMARINOS DE HDPE

Probablemente la causa más común del fracaso de los emisarios submarinos de HDPE de pequeño diámetro es el anclado inadecuado de la tubería en el fondo del mar. Esta deficiencia hace que se mueva y se dañe debido a las corrientes y rompiente del oleaje. En emisarios submarinos de HDPE de pequeño diámetro, el minado no es un problema porque el pequeño diámetro no crea las altas velocidades localizadas que se forman en las tuberías de gran diámetro, excepto en corrientes extremadamente rápidas. Debido a que las tuberías de diámetro más pequeño usan bloques de anclaje más pequeños, usualmente quedan tendidas en el fondo donde ocurre poco o ningún arrastre. Asimismo, en la mayoría de las condiciones típicas del suelo, la tubería de HDPE y los lastres tienden a reposar en la excavación de arrastre sin causar ruptura de la tubería por las características flexibles del HDPE. El HDPE también tolera mejor el movimiento que cualquier otro material para tubería submarina.

Otra causa de falla del emisario submarino de HDPE ha sido el uso de metales no resistentes a la corrosión para asegurar los lastres a la tubería. Una falla posterior de los fiadores hace que los lastres o collarines se suelten y, debido a que la tubería y sus contenidos son menos pesados que el agua marina, la tubería flota hacia la superficie. El diseño correcto y la instalación adecuada son esenciales para asegurar una larga vida útil al emisario.

8.1 Determinación de la distancia entre los lastres

La mayor presión y desviación en la viga ocurre en la instalación debido al peso de los lastres durante el flotamiento y remolque de la tubería. También puede darse por fuerzas hidrodinámicas de las corrientes y posiblemente por el hundimiento de los lastres en un lecho suave. Es importante que las distancias entre los lastres no sean muy grandes. La presión ejercida puede ser estimada como una viga simple uniformemente cargada con una unidad de carga igual a la unidad de flotación de la tubería. Para limitar la desviación a menos de 5% o la deformación a menos de 1%, se ha desarrollado el cuadro de la figura 3 para determinar el tramo máximo entre los lastres para diversas dimensiones estándar de tubería de HDPE. Se debe notar que para SDR más pequeñas, aunque el espacio entre lastres puede ser mayor, usualmente no excede de 5 ó 6 metros por razones prácticas de construcción. Este límite es una regla establecida para evitar, o al menos reducir, problemas en el manejo y acoplamiento de lastres muy grandes. También es mejor, desde el punto de vista de las fuerzas hidrodinámicas externas, tener lastres más pequeños y más cercanos que grandes y con mayor espacio entre ellos porque cuanto más cerca esté la tubería del lecho, la fuerza externa será menor.

8.2 Determinación del peso de los lastres

Existen dos consideraciones al determinar el peso para anclar adecuadamente los emisarios submarinos de HDPE en el fondo del mar. Una consideración es el lastre necesario para evitar la flotación y prevenir el movimiento horizontal debido a corrientes en áreas fuera de la zona rompiente del oleaje; la otra es prevenir el movimiento dentro de la zona rompiente del oleaje durante las peores condiciones de tormenta. Se usan dos soluciones totalmente diferentes.

El término "factor de hundimiento" se usa en las tuberías de emisarios submarinos de HDPE para describir la razón de la fuerza total hacia abajo con relación a la fuerza total hacia arriba del sistema de tuberías, incluidos la tubería, el contenido de la misma y las pesas de los lastres de hormigón (anclas o collarines). El factor de hundimiento no es más que la gravedad específica del sistema y se usa como un indicador de la estabilidad de la tubería y su resistencia a las diversas fuerzas hidrodinámicas ejercidas por el mar. Las guías señalan que los valores apropiados del factor de hundimiento varían entre 1,1 y 1,5. El autor ha descubierto que se debe tener precaución a aplicar la guía a los factores de hundimiento en la zona rompiente del oleaje marino, especialmente cuando se trata de una instalación en el mar abierto. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que es adecuado para áreas más allá de la zona rompiente del oleaje con corrientes menores alrededor de 4 nudos (0,72 m/s).

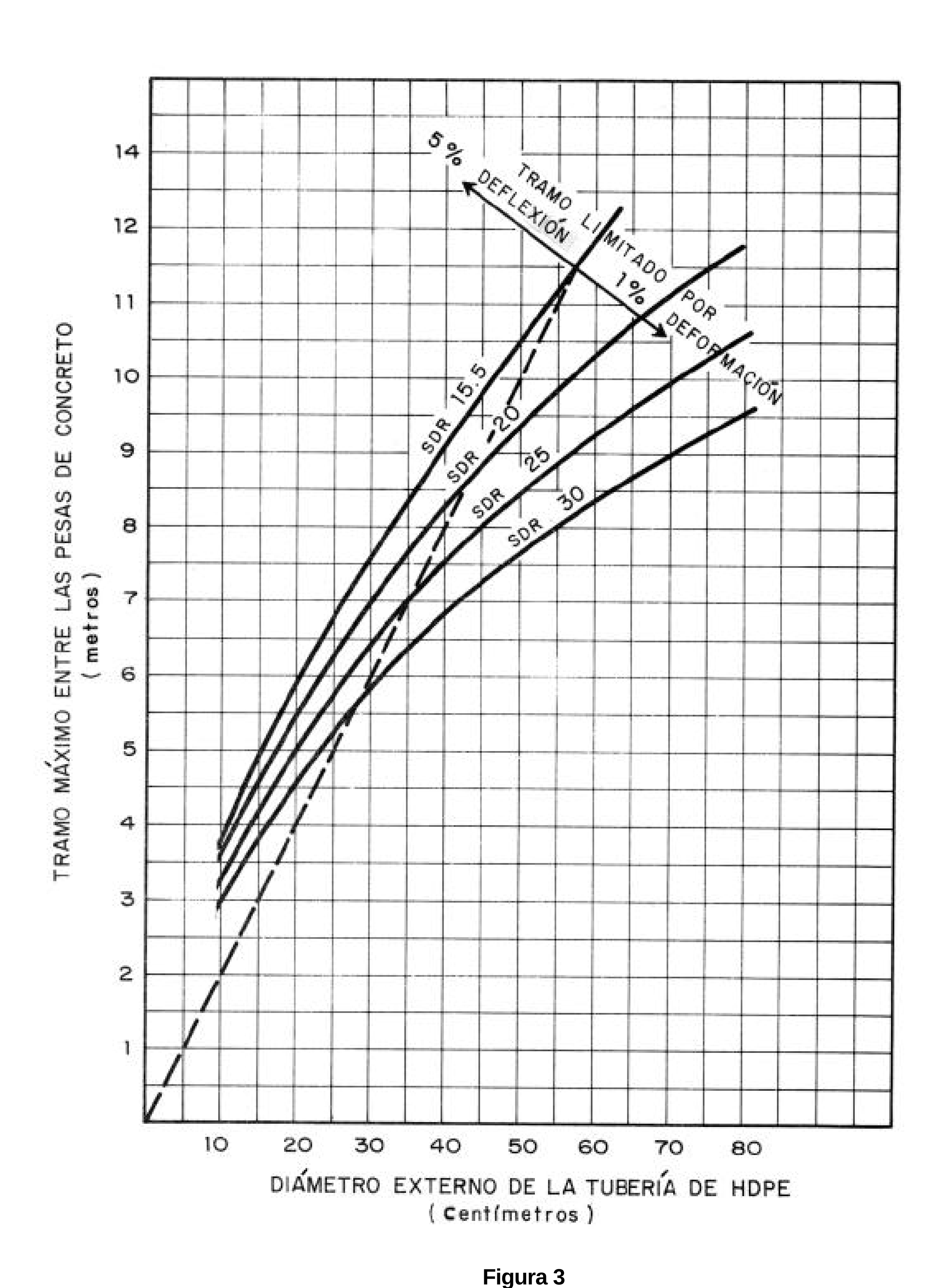


Figura 3

TRAMO MÁXIMO ENTRE LOS LASTRES DE CONCRETO PARA LAS TUBERÍAS SUBMARINAS DE HDPE
Adaptado del Manual de Instalación de Driscopipe Systems (sin fecha)

El factor de hundimiento (K) puede expresarse por la fórmula:

$$K = \frac{\text{(peso de la tubería + contenido) + (peso del lastre de concreto en el aire)}}{\text{(peso del agua reemplazada por la tubería) + (peso del agua reemplazada por los lastres)}}$$

Se define:

W_A = Peso total de cada lastre en el aire (kg o lb)
W_s = Peso unitario del contenido de la tubería (kg/m o lb/pies)
W_p = Peso unitario de tubería (kg/m o lb/pies)
W_m = Densidad del agua marina (kg/m^3 o lb/$pies^3$)
S = Distancia seleccionada entre las pesas (m o pies)
V = Unidad de volumen externo de la tubería por unidad de longitud (m^3/m o $pies^3$/pies)
W_c = Densidad del concreto (kg/m^3 o lb/$pies^3$)
K = Una constante sin unidad (razón deseada de la fuerza hacia abajo por la fuerza hacia arriba a la que se denomina frecuentemente factor de hundimiento)

Se puede reformular la ecuación:

$$K = \frac{S(W_p + W_s) + W_A}{SVW_m + W_A W_m / W_C} \quad (1)$$

El reordenamiento y solución de W_A resulta en la siguiente ecuación:

$$W_A = \frac{S(KVW_m - W_p - W_s)}{1 - K\, w_m / W_c} \quad (2)$$

Es conveniente poner el máximo peso de lastre a la tubería ubicada en la zona rompiente del oleaje y que todavía pueda flotar hasta su sitio cuando se llena de aire. Esto significa alrededor de 0,8 de ese peso máximo. Bajo estas condiciones, K = 1 y W_s = 0 la ecuación se simplifica a:

$$W_A = \frac{0.8\, S(W_m V - W_p)}{1 - W_m / W_c} \quad (3)$$

8.3 Diseño del lastre

Los lastres para los emisarios submarinos de HDPE usualmente se fabrican de concreto reforzado debido a su densidad apropiada y a su durabilidad en el agua marina. Existen muchos diseños, pero se prefiere el rectangular en vez del redondo porque entonces el lastre no rodará cuando reciba fuerzas laterales de las corrientes o las olas. La selección del diseño debe basarse en:

a. facilidad de sujetar los lastres a la tubería;
b. resistencia de los seguros a la corrosión del agua salada; y
c. facilidad de fundir el concreto.

La figura 4 muestra el diseño de un lastre para una tubería de pequeño diámetro. Este diseño tiene dos collarines rectangulares construidos de concreto de manera que pueda agraparse a la parte externa de la tubería; este diseño se conoce como tipo A. Esta variación particular usa dos pernos de material resistente a la corrosión del agua salina. También es posible usar pernos de fibra de vidrio o tubería de polietileno plástico con terminales formados al calor como medio de enlazar las mitades.

La figura 5 ilustra el diseño tipo B de lastre de concreto que es popular para las tuberías de HDPE mayor de 20 cm de diámetro. La distancia entre este tipo de lastre está limitada por la disponibilidad del equipo de manejo, en vez de estarlo por la deflexión o deformación de la tubería. Se deben construir lastres mayores con orejas levantadoras fundidas en ellas, para facilitar su manejo y fijación a la tubería.

La figura 5(A) ilustra el lastre tipo C, el que es usualmente el más fácil de instalar y tiene problemas mínimos de corrosión. Se instala en la tubería de HDPE prensándolo con dos grandes garfios a cada lado de la tubería. Luego, la tubería temporalmente deformada se inserta a través del cuello delgado (0,6 d) de la abertura y se sueltan los garfios para que la tubería recobre su forma redonda. Podría ser necesario rotar los garfios 90% para que la tubería de HDPE retome su forma completamente. Esto sólo es posible con tuberías de HDPE con peso molecular alto o extra alto.

Los lastres de concreto pueden venir ensamblados de fábrica o pueden hacerlo los trabajadores que van a instalar y ensamblar el emisario submarino de HDPE. Debido a que muchos instaladores prefieren moldear los lastres por sí mismos, a continuación se indican algunas sugerencias y precauciones.

Al moldear las dos mitades del diseño tipo A, el molde mostrado en la figura 6 usualmente se construye de forma que ambas mitades del lastre puedan moldearse al mismo tiempo con una pequeña pieza de la tubería del emisario submarino de HDPE para lograr un tamaño exacto. Las dos mitades están separadas por triplay de 1 cm (3/8"). Esto proporciona un juego suficiente para asegurar un ensamble ajustado cuando las dos mitades se empernan con el collarín del lastre al acoplarse a la tubería. Los orificios para los pernos se forman usando tubería de PVC de paredes delgadas que tienen un diámetro interno 50% mayor que el del perno a ser usado. Se mantienen en su sitio con una varilla a través del molde. La tubería de PVC se deja en el concreto como una funda para los pernos.

La figura 7 presenta el molde típico para lastres de concreto del tipo B.

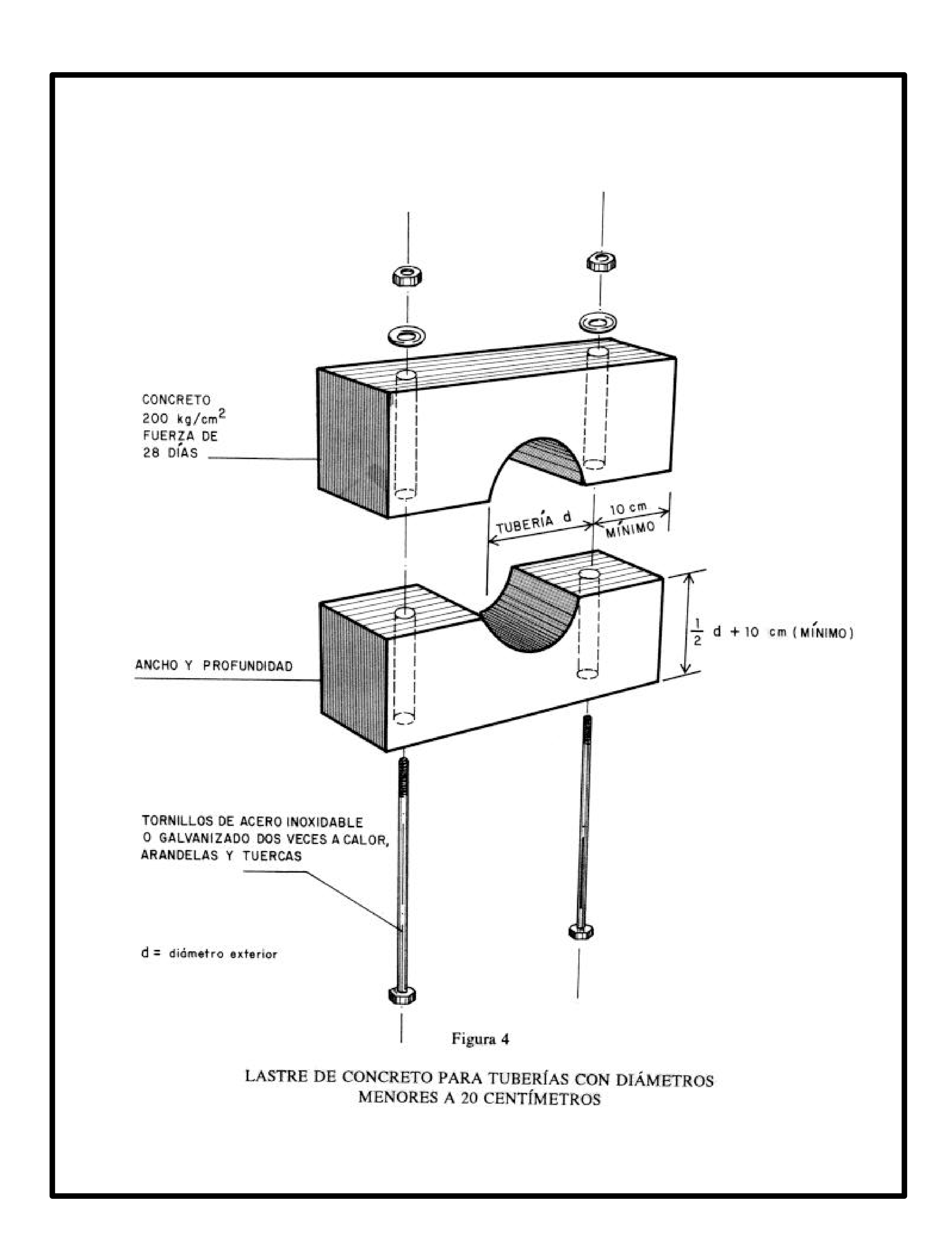


Figura 4

LASTRE DE CONCRETO PARA TUBERÍAS CON DIÁMETROS MENORES A 20 CENTÍMETROS

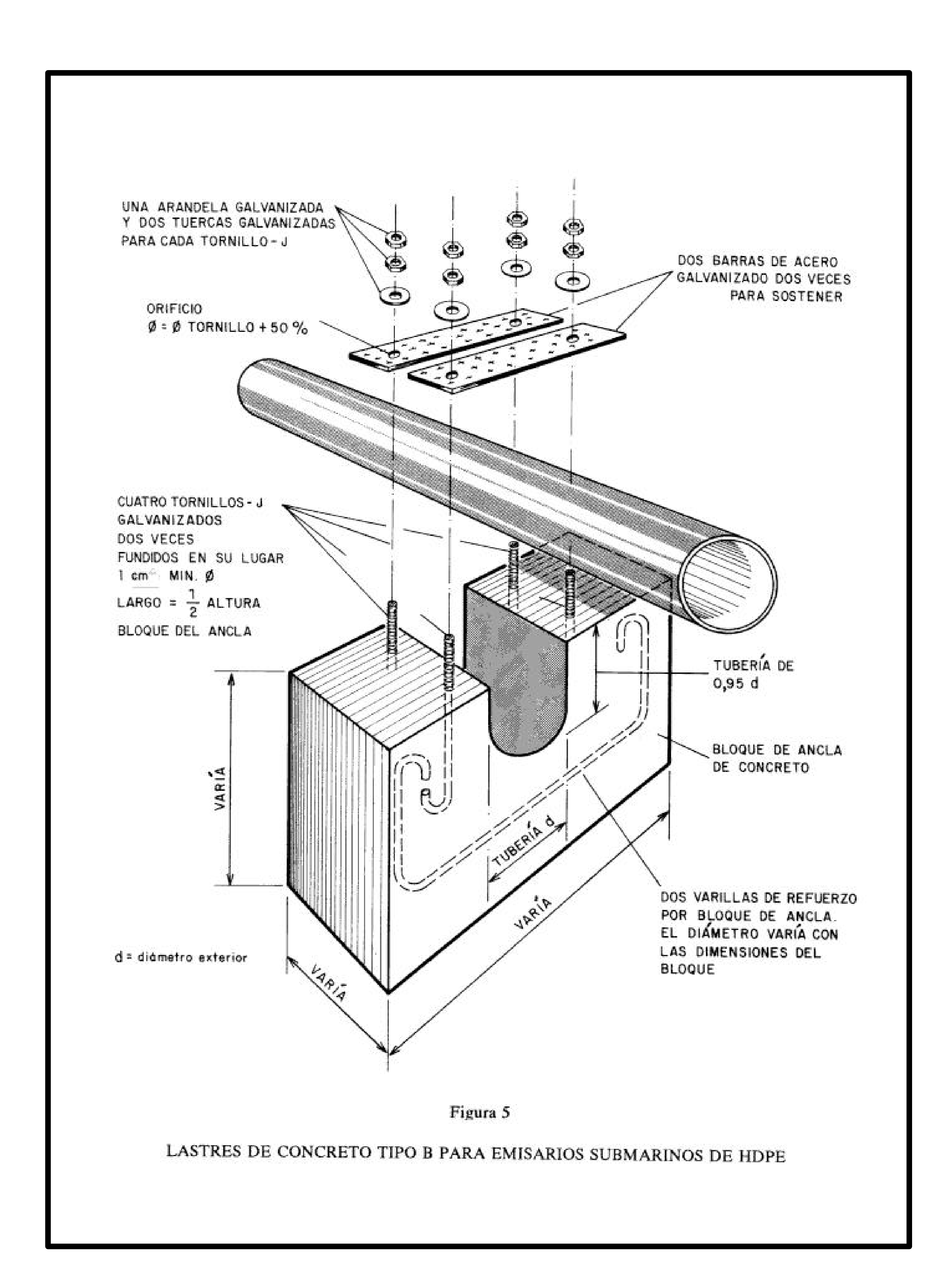


Figura 5

LASTRES DE CONCRETO TIPO B PARA EMISARIOS SUBMARINOS DE HDPE

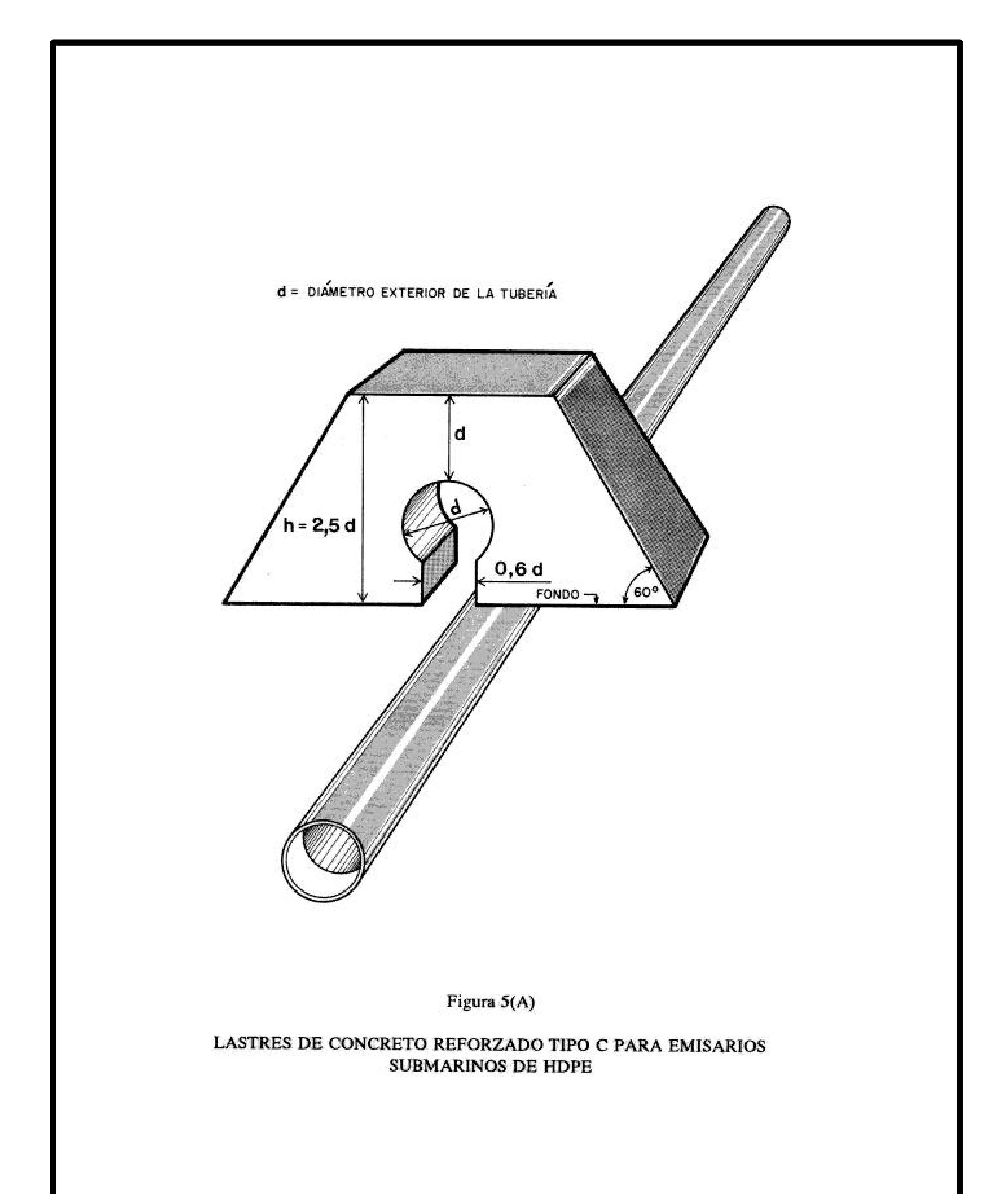


Figura 5(A)

LASTRES DE CONCRETO REFORZADO TIPO C PARA EMISARIOS SUBMARINOS DE HDPE

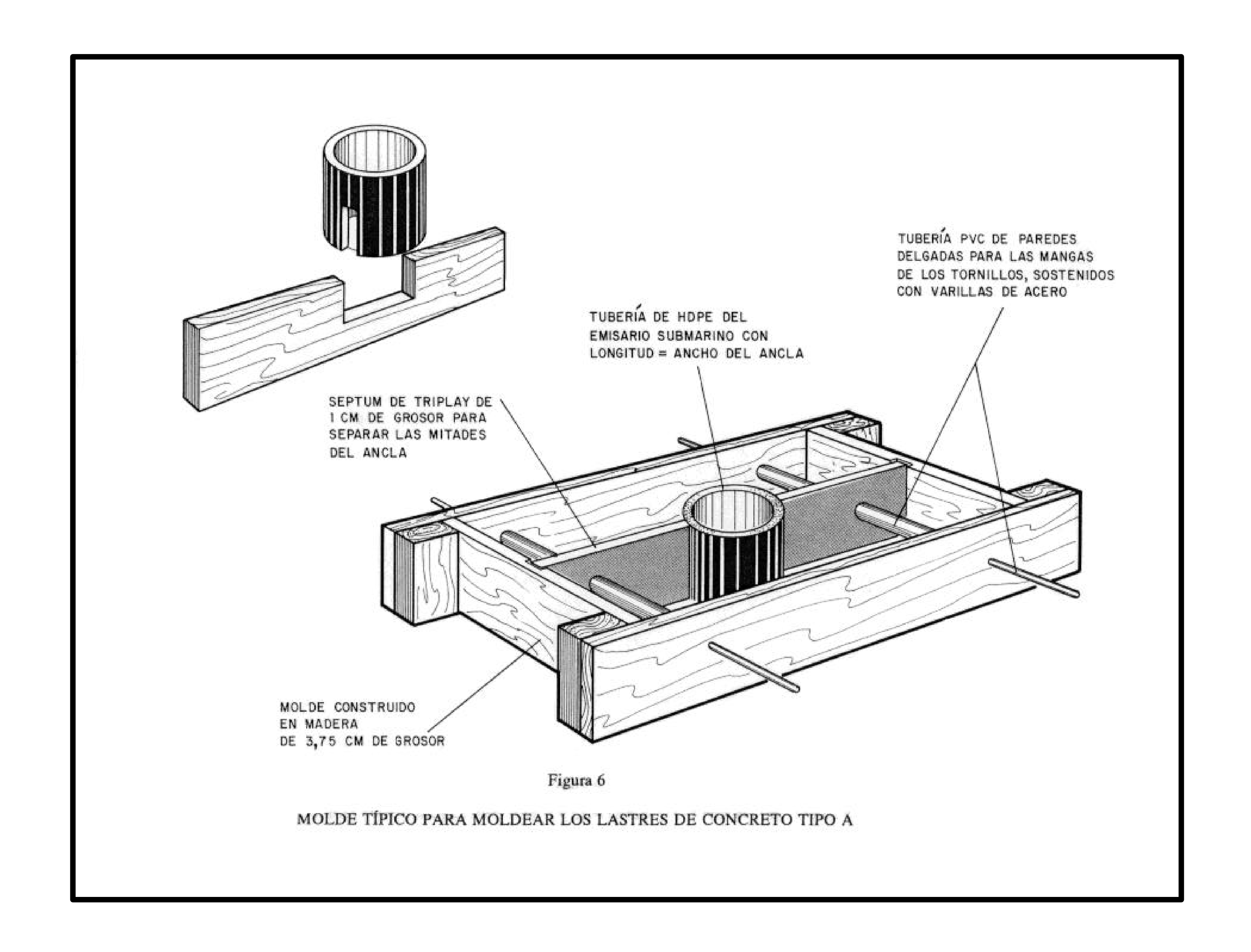


Figura 6

MOLDE TÍPICO PARA MOLDEAR LOS LASTRES DE CONCRETO TIPO A

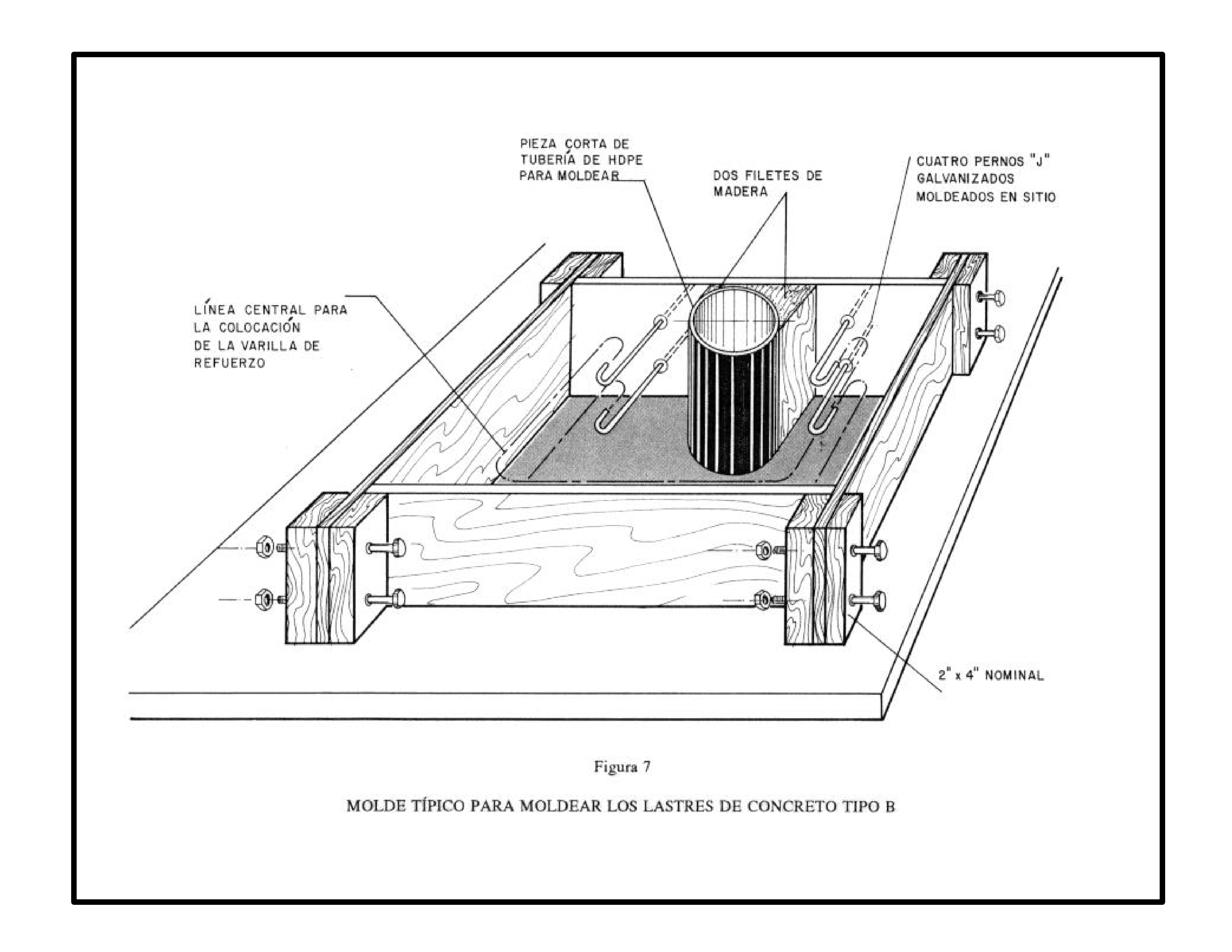


Figura 7

MOLDE TÍPICO PARA MOLDEAR LOS LASTRES DE CONCRETO TIPO B

8.4 Moldeado de los lastres de hormigón en el lugar de trabajo

Es importante planificar que el moldeado de los lastres de concreto se termine por lo menos un mes antes de la instalación del emisario submarino para permitir un tiempo adecuado de curación. Se debe considerar el moldeado de los lastres en la orilla del litoral donde se encuentra el emisario submarino para evitar su manejo y transporte innecesario.

También es una buena idea numerar las mitades cuando se quitan de su molde para asegurar la compatibilidad de los orificios de los pernos. De todos modos, el poner especial cuidado en la precisión del molde evitará mayores gastos en el futuro durante el proceso de acople.

El concreto debe ser resistente al agua salina con una fuerza mínima de 28 días de 200 kg/cm^2.

Se puede usar cemento de fuerza rápida alta para permitir la remoción temprana de sus moldes a fin de reducir el número de moldes durante el período de moldeado. Se debe usar un cemento que resista las condiciones del mar.

Es recomendable moldear lastres extras de reemplazo en caso de rupturas.

9. LUGAR DE TRABAJO PARA LA FUSIÓN DE EXTREMOS Y EL ACOPLAMIENTO DE LOS LASTRES DE ANCLAJE

La técnica de fusión de extremos por calor es el método recomendado para unir tuberías de polietileno de alto densidad y de peso molecular alto y extra alto. Este es un proceso eficiente y económico que cuenta con equipo desarrollado y perfeccionado. El proceso consiste en frezar los dos extremos de la tubería a fin de garantizar el acoplamiento; calentar a una temperatura prescrita y por un tiempo específico las superficies que van a ser unidas simultáneamente; terminar el calentamiento; unir las superficies fundidas manteniendo los extremos juntos por aplicación de presión hasta que solidifiquen según el tiempo especificado para el diámetro y espesor de la pared.

Cada lugar presenta condiciones diferentes pero es una buena inversión dedicar tiempo a la planificación cuidadosa de las operaciones de fusión de los extremos y acoplamiento de los lastres a la tubería. El concepto primario es de línea de ensamblaje para poner el ensamble completo en el agua tan pronto y fácilmente como sea posible. Los objetivos deben ser:

a. Mover y manipular los materiales lo menos posible, especialmente los lastres.
b. Colocar con exactitud los lastres de hormigón en los lugares apropiados de la tubería.
c. Poner los lastres ya acoplados de la tubería en el agua tan pronto como sea posible después de su acoplado y con el menor manipuleo posible.
d. Mantener las medidas de seguridad para evitar cualquier posible riesgo.

Es importante que la metodología escogida para la instalación de los lastres facilite la tarea al máximo. Para tuberías de diámetro menor de 300 mm, el acoplado del lastre es el proceso limitante y requiere más tiempo que el proceso de fusión de los extremos. Para tuberías de diámetro mayor de 300 mm, el proceso de fusión es el factor limitante.

El método más común para tuberías de diámetro menor de 300 mm es el de instalar una plataforma temporal de trabajo en el filo del agua (véase la figura 8) de forma que los lastres de concreto se acoplen inmediatamente antes que la tubería sea puesta en el agua. Frecuentemente se instala un trípode con aparejo de poleas en esta plataforma para el manejo y ensamble de los lastres. Se usa un sistema de rodillos para guiar la tubería desde el área de fusión de los extremos hasta la plataforma y para facilitar el movimiento hacia adelante de la tubería. Este método se usa generalmente en lugares donde la variación de la marea no es muy marcada.

Otro método exitoso es construir una pista temporal (véase la figura 9) desde encima de la línea más alta de agua hasta debajo de la marea baja y hacer una plataforma simple rodante para que corran por esta pista llevando los lastres y la tubería hasta el agua. En este caso, el trípode usualmente monta el extremo superior de la pista. Este método puede usarse en situaciones con fluctuaciones considerables de mareas y/o con lastres pesados.

Para acelerar el proceso de instalación, es común unir varias secciones de tubería dos o tres días antes de la instalación del emisario submarino a fin de reducir el número de uniones en la etapa final de instalación.

10. FLOTACIÓN, INMERSIÓN Y COLOCACIÓN DEL EMISARIO SUBMARINO

El emisario submarino de HDPE está diseñado para flotar con los lastres de concreto acoplados y la tubería llena de aire y no flotar cuando se llena con agua. El aire se retiene en la tubería por medio de un tapón plato sellado con seguridad al final de la tubería. Se acomoda el plato o tapón con una válvula de aire de entrada/salida y luego se une al terminal de la tubería. Soltando gradualmente el aire de esta válvula y permitiendo que el agua entre al emisario submarino por el extremo colocado en la orilla, el emisario submarino puede hundirse hasta el fondo comenzando en el extremo en la costa. La tasa de descenso puede controlarse por medio de la válvula de escape de aire en el terminal. Es importante que la tubería sea hundida desde la orilla continuando hacia el terminal para prevenir el entrampamiento de aire en una punta alta.

Se necesitan algunos botes pequeños para remolcar la tubería fuera de la orilla mientras se ensamblan y se acoplan los lastres a fin de ubicarla adecuadamente para luego sumergirla. Por regla general se requiere una lancha por cada 100 metros de tubería; el número de lanchas depende de las condiciones del mar.

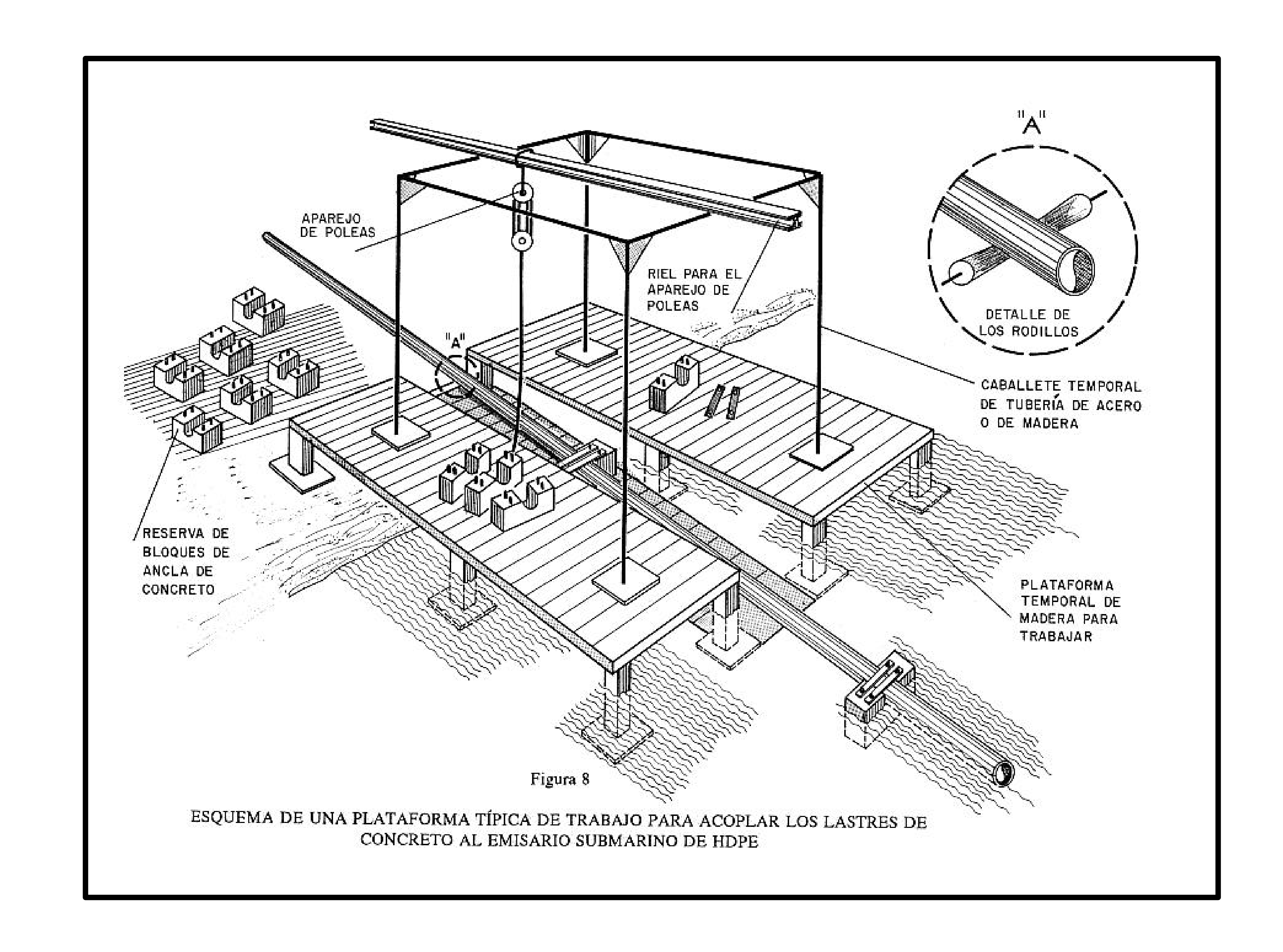


Figura 8

ESQUEMA DE UNA PLATAFORMA TÍPICA DE TRABAJO PARA ACOPLAR LOS LASTRES DE CONCRETO AL EMISARIO SUBMARINO DE HDPE

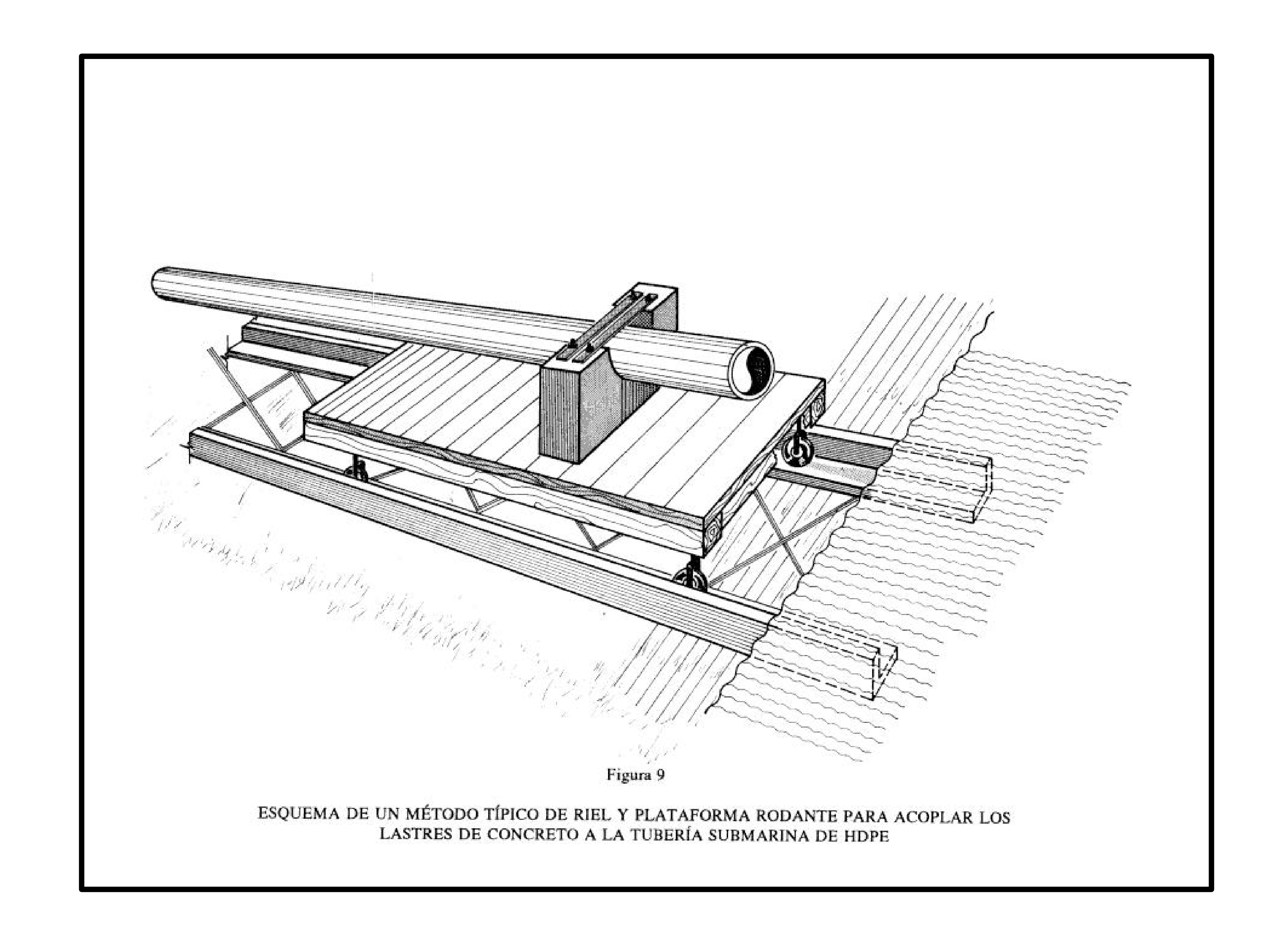


Figura 9

ESQUEMA DE UN MÉTODO TÍPICO DE RIEL Y PLATAFORMA RODANTE PARA ACOPLAR LOS LASTRES DE CONCRETO A LA TUBERÍA SUBMARINA DE HDPE

Se ubican varias lanchas a intervalos a lo largo de la tubería a favor de la corriente para jalar la tubería a su ubicación. Durante el hundimiento, la lancha al final de la tubería opera la válvula de escape de aire. El bote del terminal de la tubería no tiene que estar ubicado hasta que el extremo final se vaya a colocar. Normalmente se requieren tres lanchas de colocación en las cercanías de la sección que se va a hundir. Es más fácil permitir que la tubería se doble con la corriente, poniéndola gradualmente en su sitio a lo largo de la ruta mientras se está hundiendo.

Los buzos que están cerca de la tubería se comunican con las tres o cuatro lanchas de instalación que la remolcan hacia su ubicación y con el bote que está al final dejando salir el aire. Los buzos informan a los botes de instalación en qué dirección (izquierda o derecha) mover la tubería o si deben sostenerla, de forma de mantenerla alineada mientras que se deja posar en el lecho y también informan al operador de salida de aire cuándo dejarlo salir para que la tubería descienda. El aire se deja salir en una serie de pequeños tiros con lapsos suficientes entre los tiros para recibir la comunicación de los buzos. Es preferible soltar el aire muy despacio y no rápidamente.

Las figuras 10 y 11 representan esquemáticamente la visión del plano y el perfil de este proceso, respectivamente.

Es importante advertir que la presión del aire que se desarrolla en el tapón final será equivalente a la presión del agua en la profundidad de inmersión. El plato o tapón final deberá estar asegurado al terminal. Si el tapón o plato se suelta puede ser tan peligroso como un cañón para los trabajadores cercanos. Además, la tubería se hundirá muy rápido y pondrá en peligro a los buzos.

Cuando esto sucede, la tubería no se hundirá en forma uniforme, probablemente se montará sobre los arrecifes, rocas u otros obstáculos que debían evitarse y usualmente será necesario reemplazar el tapón o plato bajo el agua y bombear aire a la tubería desde el terminal para reflotarla y volverla a sumergir, situación que obviamente debe evitarse.

Por lo tanto, se recomienda usar una brida soldada con un plato empernado al terminal y equipar el plato con una válvula de retención y un acoplamiento de rápida conexión como ingreso para una manguera compresora de aire y un niple de tubería de acero galvanizado o bronce y una válvula de aire de bronce para el control de salida del aire. Asimismo, el bote terminal/salida de aire debe tener un compresor de aire pequeño a gasolina con una manguera por lo menos 50% más larga que la profundidad del final del emisario para permitir el reflotamiento y el ajuste si fuera necesario.

Además, todos los botes deben estar provistos de radios de dos bandas o de intercomunicadores y es conveniente contar con un sistema de comunicación con los buzos sumergidos.

Los buzos deben recibir instrucciones de mantenerse sobre la tubería en todo momento.

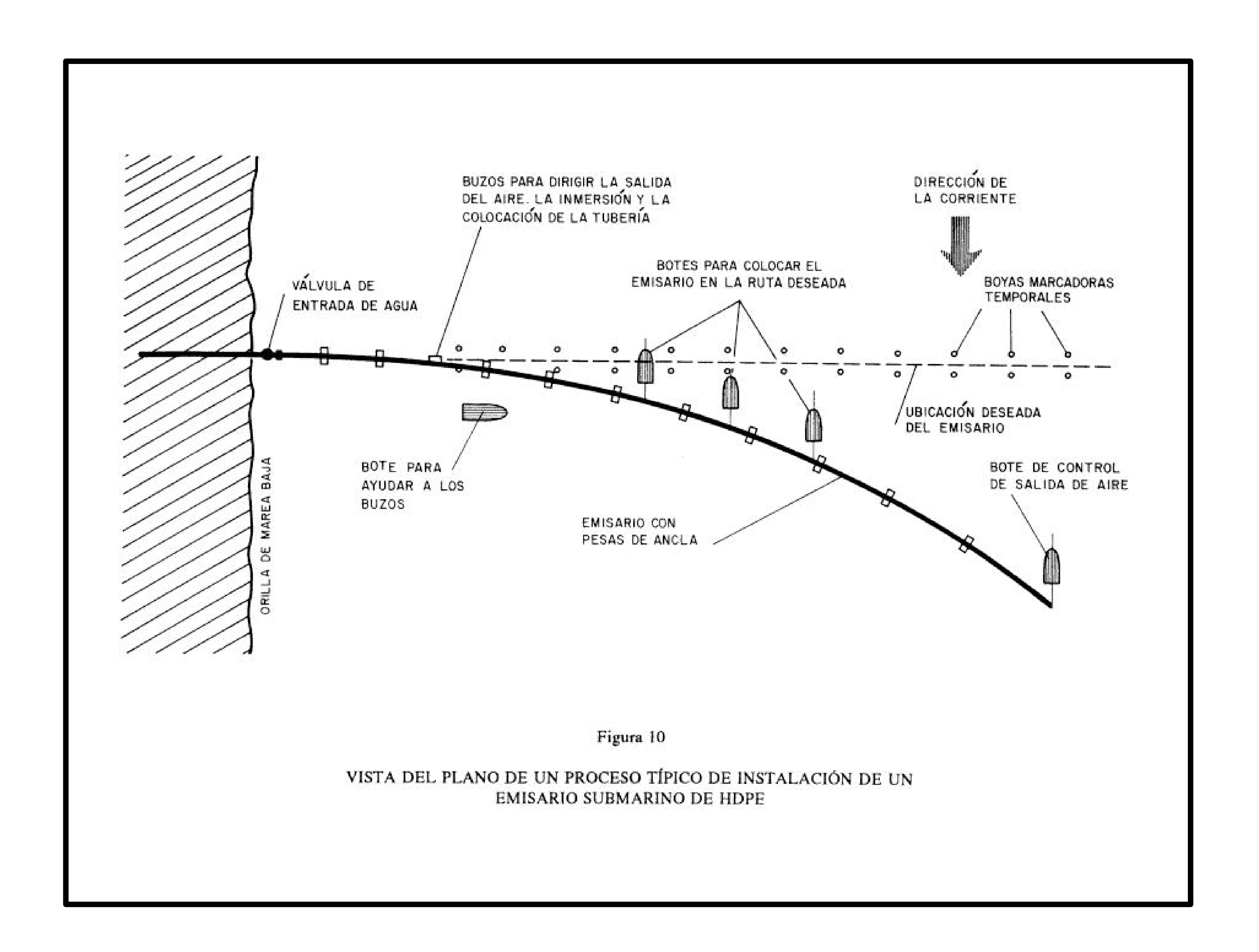


Figura 10

VISTA DEL PLANO DE UN PROCESO TÍPICO DE INSTALACIÓN DE UN EMISARIO SUBMARINO DE HDPE

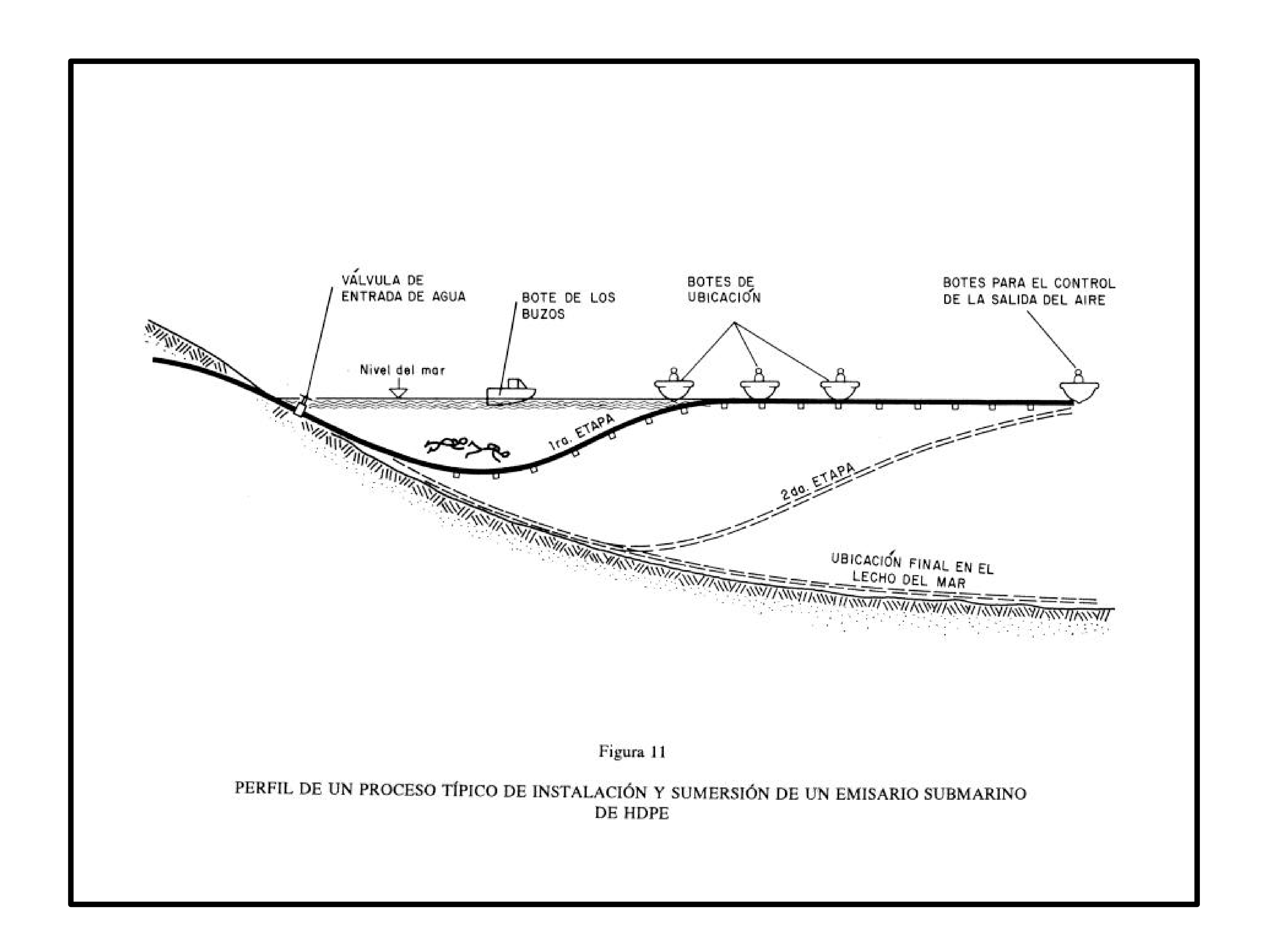


Figura 11

PERFIL DE UN PROCESO TÍPICO DE INSTALACIÓN Y SUMERSIÓN DE UN EMISARIO SUBMARINO DE HDPE

Los buzos deben tener disponibles varias bolsas grandes de aire para suspensión con correas con capacidad de levantamiento de 400 libras (181 kg) de tal forma que, si fuera necesario, se podrían hacer ajustes en la tubería sin tener que reflotarla.

Si se toman las precauciones apropiadas y si los trabajadores tienen cuidado, no habrá necesidad de este equipo, pero debe estar disponible y listo para ser usado sólo en caso que se cometa un error.

11. COSTOS

La figura 12 presenta el costo unitario de los emisarios submarinos y los difusores de HDPE con relación al diámetro de la tubería en centímetros y tiene el propósito de realizar estimados iniciales de costos. Este gráfico está basado en los costos reales de los emisarios submarinos y tuberías de HDPE instalados en los Estados Unidos y América Latina y ajustados a los costos de 1997. Se señala que el rango de costos varía considerablemente entre los límites definidos por condiciones difíciles o favorables. Lo anterior ocurre por las siguientes razones:

a) El costo unitario de construcción de un emisario del submarino de HDPE, sin incluir el costo del pretratamiento ni bombeo, está influenciado por varios factores, siendo los principales el costo del material, el del ensamblaje e instalación, y el del terreno. El costo del material depende del grado de material de la tubería, el espesor de su pared, la ubicación del fabricante, el peso y el espaciamiento entre los lastres de hormigón requerido para mantener la tubería en su sitio, el costo del cemento Portland, la arena y la grava, la ubicación de la planta de concreto y de los proveedores de equipo de fusión y manipuleo de tuberías, así como de los costos de transporte.

b) El costo unitario de la construcción real depende de la topografía, la accesibilidad al sitio, las condiciones del fondo del mar, el clima, las condiciones hidrodinámicas del océano, así como la experiencia del instalador y las técnicas de construcción utilizadas.

c) El costo total de un emisario submarino de HDPE de pequeño diámetro depende mayormente de su longitud, la que a su vez depende de la gradiente del lecho marítimo, la proximidad de las áreas de cosecha de mariscos y de playas de uso recreativo y la dirección y velocidad predominante de la corriente marina. Estos factores también influyen en la longitud del difusor y esto es significativo pues el costo unitario del difusor es generalmente mayor que el costo unitario de la tubería submarina. En menor grado, también influye la ubicación donde el emisario entra al océano y la dificultad que presente esta entrada.

d) Un error de juicio que puede aumentar enormemente el costo es optar por instalar un emisario durante estaciones de mal tiempo y de fuerte oleaje, por tanto, estas condiciones deben evitarse.

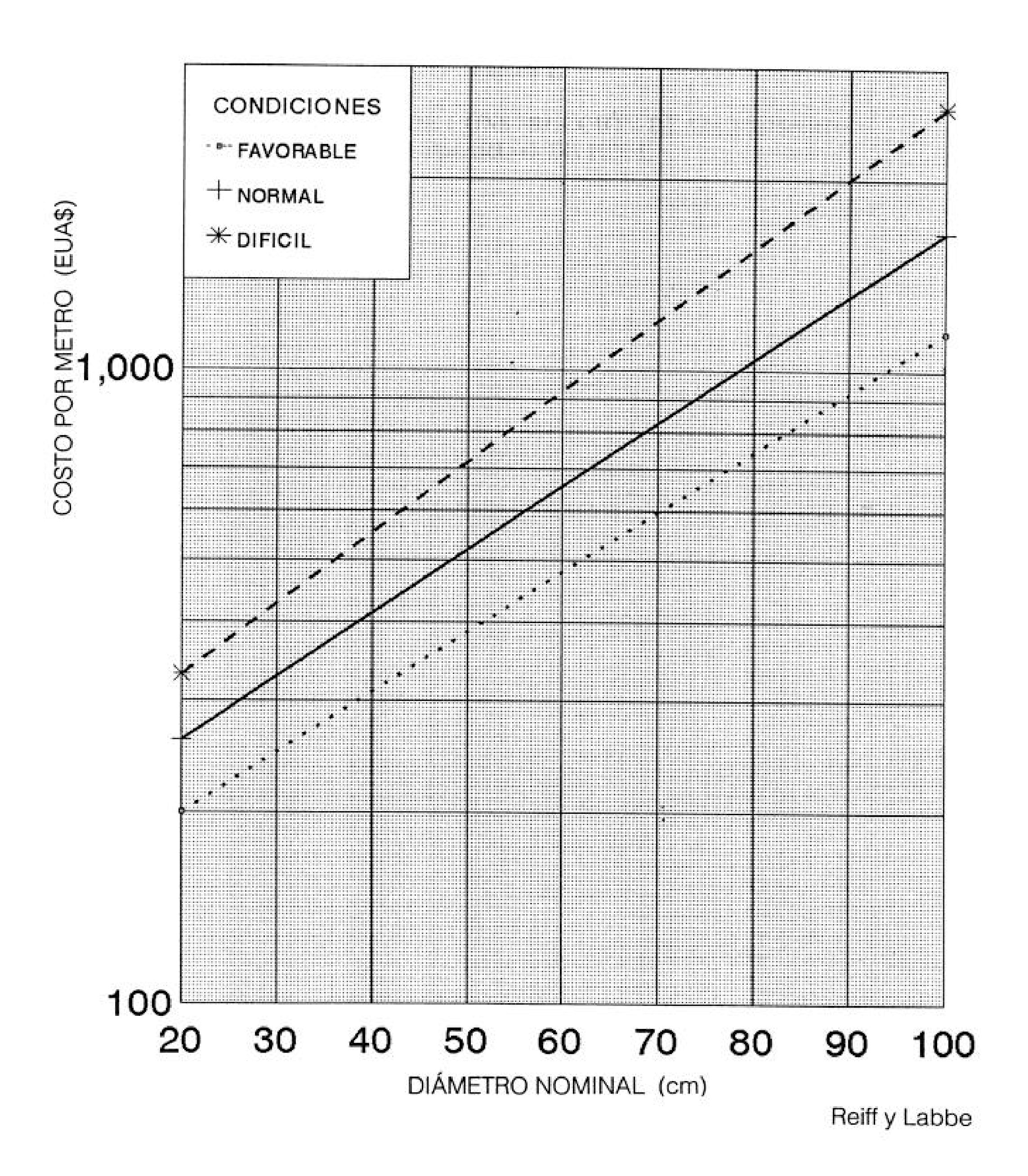


Figura 12

COSTO UNITARIO DE CONSTRUCCIÓN DE UN EMISARIO SUBMARINO DE HDPE

Generalmente, se asume que el diseño elegante y las técnicas eficaces de construcción ahorran costos. Sin embargo, debe recordarse que la información exacta y completa es la base para reducir costos a través de la optimización del diseño y el empleo de métodos eficaces de construcción. Una de las finalidades principales de este documento es señalar la información y los datos que son necesarios y promover su recolección antes de tomar una decisión importante o de encontrarse con problemas graves.

12. PROBLEMA EJEMPLO

Escoja el diámetro de la tubería de HDPE y determine el espaciamiento y peso de los lastres de concreto para el emisario submarino de una comunidad con 20.000 habitantes que generan un flujo de aguas residuales de 4.000 m^3/día y que tiene una población proyectada de 42.000 personas y un flujo de aguas residuales de 10.000 m^3/día al final del período de diseño de 25 años. El flujo pico es 150% del flujo promedio. La zona de rompiente del oleaje en el lugar seleccionado para el emisario submarino termina a una profundidad de 7 metros, a 200 metros de la orilla y el área seleccionada de descarga del emisario submarino está ubicada a 700 metros adicionales mar afuera, a una profundidad promedio de 27 metros. Las condiciones del lecho son arena y grava con algunos afloramientos de rocas. El lecho de la zona de rompiente del oleaje es de arena y grava. La ubicación del emisario submarino está frente al mar abierto. La carga hidráulica de gravedad disponible es 5,4 metros sobre el nivel de marea alta-alta; 7,4 metros sobre el nivel promedio del mar; y 7,9 metros sobre el nivel de marea baja-alta.

<u>Solución</u>

12.1 Paso I: Selección del diámetro de la tubería

La estrategia para diseñar un emisario submarino apropiado es obtener las velocidades de limpieza por lo menos una vez al día bajo condiciones actuales y aún así no obtener cargas hidráulicas excesivamente altas antes del término de la vida diseñada del emisario submarino (en este caso 25 años). No siempre es posible conseguir ambos objetivos y cuando esto ocurre se debe analizar el tipo de curvas de crecimiento de la población proyectada para determinar si es mejor decidir por los flujos de aguas residuales actuales, intermedios o la vida útil de diseño.

Para este problema se debe tratar de obtener velocidades de limpieza de un metro/segundo a nivel promedio del mar bajo las condiciones actuales de flujo pico y tratar de excluir o minimizar la necesidad del bombeo por lo menos para los últimos cinco años de la vida del diseño.

El primer paso es calcular los flujos pico en litros por segundo para poder utilizar el nomograma de la figura 1.

<u>Flujo pico actual</u>

$$Q_{ppf} = 4.000\ m^3/dÍa \times 1{,}5 \times 0{,}0116\ \frac{litros/seg}{m^3/dia}$$

$$Q_{ppf} = 69{,}5 \text{ redondeado a } \underline{70 \text{ litros/segundo}}$$

<u>Flujo pico de diseño</u>

$$Q_{dpf} = 10.000\ m^3/dÍa \times 1{,}5 \times 0{,}0116\ \frac{litros/seg}{m^3/dÍa}$$

$$Q_{dpf} = 174 \text{ redondeado a } \underline{175 \text{ litros/segundos}}$$

El siguiente paso es determinar la carga hidráulica estática disponible. Esta es una carga hidráulica estática de 7,4 metros menos la carga de densidad del agua de mar. La carga de densidad del agua marina (h_{ds}) es igual a la profundidad de inmersión multiplicada por 0,025. Para un nivel promedio del mar h_{ds} = 27 m x 0,025 = 0,68 ≅ 0,7.

La carga hidráulica impulsora disponible (h_d) al nivel promedio del agua marina es la carga hidráulica de gravedad disponible (7,4 m) dada menos la carga hidráulica de densidad.

$$h_d = 7{,}4 - 0{,}7 = 6{,}7m$$

El siguiente paso es determinar el diámetro de la tubería que proporcionará una velocidad de limpieza de 1 m/s para el flujo pico actual (70 l/s). Con el nomograma de Hazen-Williams de la figura 1 se obtiene un diámetro de 30 cm.

Al revisar la pérdida de carga hidráulica para este diámetro y flujo con el nomograma y un factor de C de 155 para tubería de HDPE, se obtiene una pérdida de carga hidráulica de 2,4 metros por 1.000 metros de longitud. Para una longitud de 900 metros, esto da un total de 2,16 m de pérdida de carga hidráulica, lo que está dentro de la carga hidráulica total disponible.

Luego se revisa la pérdida de carga hidráulica que podría ocurrir en una tubería de HDPE de 30 cm para el flujo pico de diseño. Una vez más, con el nomograma y un flujo de 175 litros/segundo, se obtiene una pérdida de carga hidráulica de fricción de 13,5 metros/1.000 metros y una velocidad de 2,7 metros/s. La pérdida de fricción para 900 metros sería 12,15 metros. Debido a que sólo 6,7 metros de la carga hidráulica de gravedad están disponibles, sería necesario aumentar otros 5,5 m

adicionales de carga hidráulica bombeando para obtener estos flujos. Esta podría ser una propuesta muy cara para una ciudad con 20.000 habitantes.

Seguidamente se ve la posibilidad de usar el siguiente diámetro mayor de la tubería de HDPE que es 36 cm. Para el flujo de diseño esto dará una velocidad de 1,86 m/s y una pérdida por fricción de alrededor de 5,3 metros por 1.000 metros o 4,8 metros para la longitud del emisario. Sin embargo, esto podría resultar en una velocidad de solo 0,7 metros/s bajo las condiciones actuales de flujo pico y por lo tanto es muy posible que se tenga que insertar un destapador de limpieza a través del emisario submarino en forma regular hasta que los flujos pico aumenten suficientemente para crear velocidades de limpieza.

Tomando como base la curva de población proyectada, el ingeniero tendría que determinar si el costo de bombeo (para cualquier lapso que fuera necesario) sería más o menos alto que el costo adicional incurrido al cambiar una tubería de 30 cm de diámetro por otra de 36 cm de diámetro. Para este problema particular se puede decir que las condiciones han favorecido la tubería de 30 cm de diámetro.

12.2 Paso II: Distancia entre los lastres de concreto en la zona de rompiente del oleaje

Para este problema se usará una SDR de 21 para la zona de rompiente del oleaje y una SDR de 32,5 en aguas más profundas. Con el cuadro 3 puede seleccionarse una tubería de diámetro nominal de 12 pulgadas con diámetro interior de 291 mm y exterior de 324 mm. El peso de esta tubería por unidad de longitud es 15,07 kg/m. Se calcula que el volumen externo de la tubería es 0,0824 m^3/metro de longitud. La densidad del concreto es 2.400 kg/m^3 y el peso de esta agua marina es 1.025 kg/m^3. Refiriéndose a la figura 3 para una SDR 21, se debe usar una distancia menor de 7,2 metros. En esta situación, debido al interés de emplear tanta mano de obra como sea posible, se usará una distancia de 2,5 metros en la zona rompiente del oleaje.

Entonces los pesos de los lastres de concreto se calculan con la ecuación (3) del texto.

$$W_A = \frac{0{,}8S\,(W_m V - W_p)}{1 - W_m / W_c}$$

$$W_A = \frac{0{,}8 \times 2{,}5m\,[(1.025\ kg/m^3 \times 0.0824m^3/m) - (15{,}07\ kg/m)]}{1 - \dfrac{1.025}{2.400}}$$

$$W_A = 242\ kg$$

12.3 Paso III: Distancia entre los lastres de concreto más allá de la zona de rompiente del oleaje

Para esta zona se selecciona una tubería del mismo diámetro, pero con una SDR de 32,5 y un factor de hundimiento de K = 1,3. La unidad de peso de la tubería es W_p = 9,82 kg/m de longitud.

En este punto se podría calcular el peso del lastre de concreto de diferente tamaño o se podría usar el mismo peso del lastre calculado para la zona de rompiente del oleaje, pero con más distancia entre ellos. Para la construcción, usualmente es más práctico usar el peso del lastre de concreto de tamaño estándar que se aplica en este problema. Entonces, reordenando la ecuación (2):

$$W_A = \frac{S(KVW_m - W_p - W_s)}{1 - KW_m / W_c}$$

Para hallar el espaciamiento S, se obtiene:

$$S = \frac{W_A(1 - KW_m / W_c)}{(KVW_m - W_p - W_s)}$$

entonces:

$$S = 242 \frac{(1 – 1,3 \times 1.025/2.400)}{(1,3 \times 1.025 \times 0,0824 – 9,82 – 72,1)}$$

$$= 3,86 \text{ metros}$$

Debido a que esta distancia de 3,86 metros es menor que la de 5,6 metros máxima permitida entre los lastres por la figura 3 para una SDR de 32,5 y un diámetro exterior de 324 mm, sería apropiado para el emisario submarino más allá de la zona rompiente del oleaje.

13. REFERENCIAS

- McJunkin, F.E. y Pineo CH.S. (1969). The role of plastic pipe in community water supplies in developing countries. US Agency for International Development.

- Phillips Driscopipe Inc. (sin fecha). Driscopipe systems installation manual. Phillips 66. P.O. Box 508, Watsonville 95076, California.

- Phillips Driscopipe Inc. (1996). Driscopipe systems design manual. Phillips 66. P.O. Box 508, Watsonville 95076, California.

- Chevron Chemical Company (1988). Sistemas de tubería industrial. Plexco Boletín No. 104.

- Chevron Chemical Company (1987). Sistemas de tubería municipal. Plexco Boletín No. 112

- Chevron Chemical Company (1988). Procedimientos de fusión de extremos. Plexco Boletín No. 108